Afrique SCIENCE *16(2) (2020) 177 - 191*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Contribution à l'étude Hydrochimique des ressources en eau de la ville de Sarh, Sud-Est du Tchad

Edith KADJANGABA[1,2*], Mekila LE BANDOUMEL[1], Sabine DJIMOUKO[3], Yaya MAHMOUT[4] et Jean-Claude Doumnang MBAIGANE[1]

[1] Université de N'Djamena, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement (LABEEN), BP 1027 N'Djamena, Tchad
[2] Université de Doba, Faculté des Sciences et Techniques, BP 03 Doba, Tchad
[3] Université de Moundou, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, BP 206 Moundou, Tchad
[4] Université de N'Djamena, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Laboratoire des substances Naturelles, BP 1027 N'Djamena, Tchad

* Correspondance, courriel : *edith.kadjangaba@gmail.com*

Résumé

L'objectif de cette étude est de faire tout d'abord une évaluation qualitative des ressources en eau de la ville de Sarh. Elle est caractérisée par des ressources en eau importantes. Cependant la présence de nombreux foyers de pollution peut altérer la qualité de ces eaux. Au total, dix-neuf points d'eaux (superficielle et souterraine), répartis dans la ville, ont été échantillonnés durant le mois Mai 2017. Les résultats des analyses montrent que la totalité des eaux de surface analysées ont des teneurs qui sont conformes aux normes OMS à l'exception du fer qui dépasse les normes OMS avec une moyenne de 1,54 mg/L. La teneur en fer est également élevée dans la totalité des points d'eaux souterraines prélevées avec une moyenne de 0,58 mg/L. Ces teneurs moyennes en fer anormalement élevées sont dues à la nature géologique du terrain riche en fer et en partie à la vétusté de la tuyauterie métallique et aux dépôts d'ordures. Certains points présentent des teneurs anormalement élevé en Nitrates, potassium, sodium, calcium. La minéralisation des eaux de la ville de Sarh résulte de l'interaction de plusieurs processus : l'hydrolyse des silicates, les échanges de base, l'influence de la température et celle des activités anthropiques.

Mots-clés : *minéralisation, ressource en eaux, pollution, hydrochimie.*

Abstract

Contribution to the Hydrochemistry study of water resources in the Sarh city, Southeastern Chad

The aim of this paper is first to make a qualitative assessment of water resources in the city of Sarh. This city is characterized by significant water resources; however, the presence of several sources of pollution can affect the quality of these waters. In total, nineteen water points (superficial and underground), spread in the city, were sampled during the month of May 2017. It comes out from the analysis that all the analyzed surface waters have contents that are in accordance with WHO standards, except iron that exceeds the WHO norms

with an average of 1, 54 mg/L. the iron content is also high in all the groundwater sampled with an average of 0, 58 mg/L. This average iron content, which is abnormally high, is due to the iron-rich geological nature of the soil, to the poor state of the metal pipes, and to the deposit of garbage. Some water points have abnormally high Nitrate, potassium, sodium, calcium contents. The mineralization of the waters of the city of Sahr is the result of the interaction of several processes: the hydrolysis of silicate, basic exchanges, and the influence of temperature and that of human activities.

Keywords : *mineralization, water resources, pollution, hydrochemistry.*

1. Introduction

L'eau est devenue un vrai enjeu au XXI^{ème} Siècle. A l'échelle de la planète terre, l'eau douce ne représente que 3 % des réserves mondiales, de plus elle est inégalement répartie à travers le monde or elle constitue une ressource vitale aussi bien pour les humains, les animaux que les plantes. Mais au cours de ces dernières décennies, des études ont révélé une importante détérioration de la qualité de l'eau des systèmes aquatiques continentaux dans leur ensemble, à cause du développement rapide des industries, de l'agriculture et de la croissance démographique. Il est donc nécessaire de comprendre comment se fait la minéralisation de l'eau, seul moyen qui permet de conserver cette ressource afin qu'elle puisse répondre au besoin en eau des utilisateurs actuellement tout comme dans le futur [1]. En Afrique Sub-Saharienne, de nombreuses études soulignent l'état de pollution des eaux dans les villes, cette pollution est liée aux activités anthropiques aussi bien dans les périmètres urbains que péri urbains [2 - 5], alors qu'elle constitue un facteur de développement démographique et socioéconomique très important dans ces régions, d'où la nécessité d'avoir une meilleure connaissance des ressources en eau existantes, de disposer surtout d'informations concernant la vulnérabilité de ces ressources par rapport à un éventuel facteur, et prendre des mesures nécessaires pour développer, gérer et protéger les ressources [6]. Au Tchad, et en particulier à Sarh, la majorité de la population n'a pas accès au réseau d'adduction d'eau potable, elle utilise donc des puits à large diamètre et des forages équipés de pompe à motricité humaine qui captent les eaux souterraines auxquelles elle associe l'eau de surface pour satisfaire ses différents besoins. En général, les eaux souterraines sont exemptes de pollution comparé aux eaux de surface [7] car mieux protégé que les eaux de surface.

Ces dernières sont plus vulnérables car elles constituent de bons réceptacles de polluants et des eaux usées. Toutefois, à l'heure actuelle, dans de nombreuses régions du monde, la qualité des eaux souterraines surtout lorsqu'elles sont peu profondes, est en train de changer sous l'influence des activités humaines. Au niveau de la ville de Sarh, l'accès à l'eau ne constitue pas un véritable problème car les précipitations sont assez abondantes, ce qui garanti un approvisionnement constant en eau. Donc le problème qui peut se poser c'est celui de la qualité de cette eau à cause des diverses pressions qu'elle subit. La détérioration de la qualité des eaux peut avoir une origine naturelle ou anthropique, ou résulter de la combinaison des deux : évaporation et échange entre l'eau et l'encaissant, fosses septiques, latrines, automobiles, déchets, eaux usées, industries, agriculture. En effet, dans la ville de Sarh on note la présence de nombreux foyers de pollution susceptible de dégrader aussi bien les eaux de surface que les eaux souterraines. On a d'une part l'influence des sources ponctuelles constituées par les eaux usées domestiques, les eaux industrielles, les ordures ménagères et déchets. La ville est dépourvue de réseaux d'assainissement, les eaux usées et les eaux pluviales sont drainées à travers des caniveaux, plus ou moins aménagés, à ciel ouvert. Ces caniveaux construits initialement pour l'évacuation des eaux pluviales deviennent ainsi de véritables égouts, qui collectent aussi les savons ou les lessives issus des usages domestiques. A cela s'ajoute le rejet des eaux

usées en pleine rue. Le long du fleuve (Chari), on dénombre au total quatre (4) grandes industries à savoir, la Compagnie Sucrière du Tchad (CST) qui assure la culture de canne à sucre et la production du sucre raffiné, la Cotontchad Société Nouvelle (CSN) qui assure la production du coton fibre, l'Abattoir moderne qui a pour principale activité l'abattage, la conservation et le transport des carcasses du gros et du petit bétail permettant d'approvisionner en viande fraîche. Les effluents de ces usines, généralement très chargés en matières polluantes sont déversés directement sans traitement préalable dans le fleuve (Chari), expliquant ainsi l'apparition de certaines maladies notifiées par les structures sanitaires. De plus pour avoir une certaines autonomie, ces usines abritent également des ateliers de réparation et d'entretien qui rejettent les matières polluantes dans la nature. Il en est de même pour les petites entreprises des particuliers (garage de réparation d'automobiles, ateliers de tôlerie, de soudure, de mise en peinture, etc.) disséminées un peu partout dans la ville. Les ordures ménagères sont déposées en vrac en divers endroits de la ville sans tri préalable et forment de véritables décharges sauvages. La procédure de leur rejet est similaire à celles des eaux usées domestiques. La plupart des unités d'habitation utilisent des latrines traditionnelles, qui sont des trous creusés jusqu'à proximité de la nappe. Lorsqu'elles ne sont pas dotées de ces structures, les habitants font leur besoin dans la nature. Les lixiviats peuvent ainsi être entraînés jusqu'aux nappes d'eaux souterraines en saison des pluies et les latrines peuvent les affecter directement lors de la remontée piézométrique. D'autre part, on a les sources diffuses essentiellement liées aux activités agricoles. La production agricole provient des petites exploitations familiales qu'on trouve autour des habitations, elle est diversifiée et concerne entre autre la culture de sorgho, mil, arachide, coton, sésame. Dans le souci d'accroitre la production en vue de satisfaire une demande sans cesse croissante, les agriculteurs et les maraîchers utilisent de grandes quantités d'engrais minéraux et de pesticides chimiques. La pollution est également engendrée par les excrétas d'animaux notamment les moutons, les bœufs, les porcs [8] ainsi que la volaille, qu'on trouve autour des habitations. Si la pollution, générée par les activités anthropiques, atteint des niveaux critiques, cela peut présenter un danger grave pour la santé publique [9]. Il est donc à craindre que la qualité des eaux ne se dégrade de plus en plus dans cette ville où la quasi-totalité des ménages exploitent les différentes ressources d'eaux (superficielle et souterraine) pour satisfaire leurs besoins en eau. C'est dans ce contexte que nous avons entrepris cette étude dans le but d'évaluer la qualité physicochimique de ces eaux, de comprendre les mécanismes qui sont à l'origine de la minéralisation de ces eaux et de proposer des solutions aux problèmes de pollution. Les résultats de cette étude serviront à élaborer de futures stratégies de gestion rationnelle de l'eau de la ville de Sarh dans le cadre du développement durable.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La ville de Sarh, autrefois nommée Fort - Archambault, est située dans le Sud-Est du Tchad ***(Figure 1)*** non loin de la frontière Centrafricaine. Elle est le chef-lieu de la province du Moyen Chari et du département de Bahr koh. Elle se trouve dans la partie méridionale du bassin du Lac Tchad, précisément dans le sous bassin du Chari. Elle a une superficie d'environ 37 Km^2 et s'étend entre les latitudes 9°10' et 9°18' Nord et les longitudes 18°36' et 18°42' Est. L'altitude est comprise entre 361 m et 389 m avec une pente qui varie de 0,7 à 3,1 %. La ville est soumise à un climat de type soudano-guinéen, la moyenne pluviométrique annuelle calculée à partir des données pluviométriques recueillies de 1965 à 2016 à la station de Sarh est de 974 mm et les températures ont une moyenne de 28°C. Sous la ville de Sarh se trouve une série sédimentaire qui s'échelonne du Crétacé au Quaternaire dont l'ensemble repose sur le socle cristallin. Les formations tertiaires et quaternaires affleurent et recèlent les principales nappes d'eaux souterraines. D'après Wollf [10], les

formations du Continental Terminal sont constituées de grès ferrugineux, grès bigarrés, grès mollassiques, argilites, sables, cuirasses latéritiques tandis que celles du Quaternaire renferme les alluvions fluviatiles récentes. Le réseau hydrographique est représenté par deux cours d'eau permanents ***(Figure 1)***, à savoir le Chari qui prend sa source en République centrafricaine et borde la ville tout le long de son côté nord-est ; le Bahr koh, un des affluents du Chari, borde quant à lui la partie sud-ouest de la ville, les caractéristique hydrologiques de ce cours d'eau ne sont pas connues. La ville fait partie d'une zone à vocation agro-pastorale où l'agriculture et l'élevage occupent une place importante dans l'économie de la région.

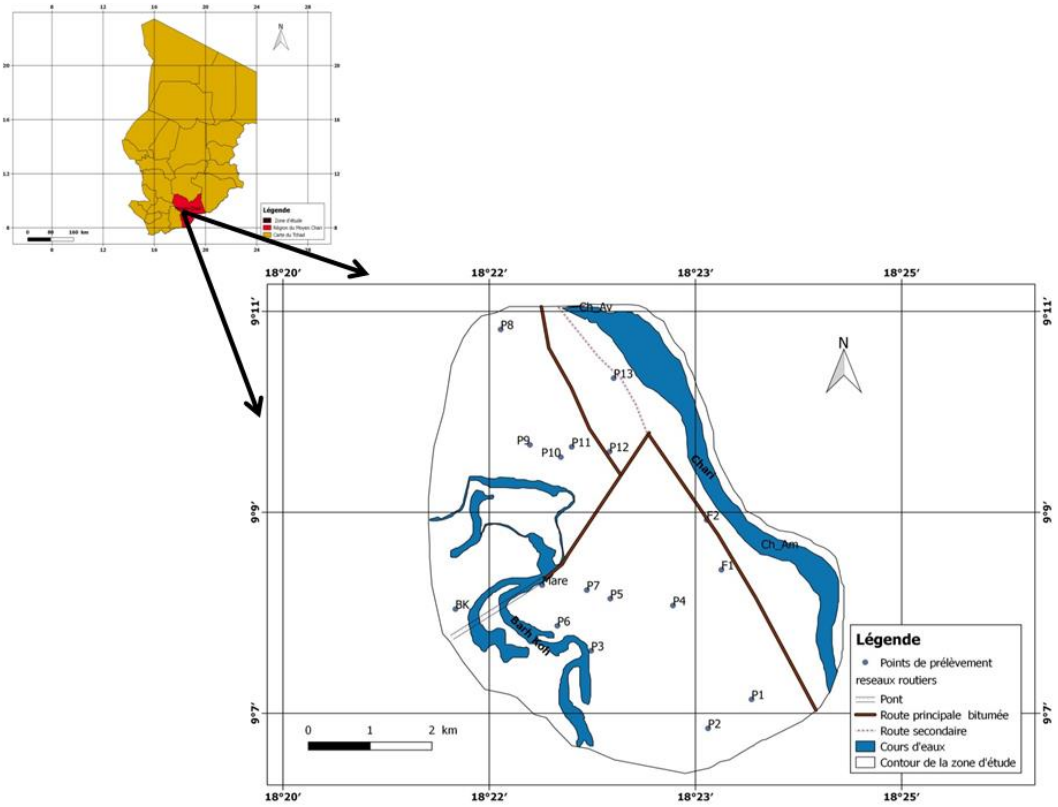

Figure 1 : *Localisation de la zone d'étude et des points prélevés*

2-2. Échantillonnage et analyse

Des prélèvements sur 19 points d'eau ont été réalisés (eaux de surface, puits, forages,) de manière à avoir une image d'ensemble des eaux ***(Figure 1)***; ces points ont été localisés par GPS. Le pH et la température ont été mesurés in situ grâce à un dispositif muni d'une électrode mixte pH 323/SetB et la conductivité grâce au conductimètre à l'électrode Lf 318/Set. Les échantillons destinés aux analyses chimiques sont prélevés dans des flacons en plastique, ces derniers ont été préalablement rincés soigneusement par l'eau à prélever. Les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire Nationale de l'Eau (LNE) du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement. Les méthodes analytiques varient selon les éléments chimiques et portent sur les éléments majeurs et mineurs ; c'est ainsi que HCO_3^- a été dosé par la méthode volumétrique, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, NO_2^- ont été déterminés grâce au Photomètre DR7100 et SO_4^{2-}, NO_3^-, Fe^{3+}, Mn^{2+} par spectrométrie (le DR890). Les données chimiques ont été analysées statistiquement à l'aide du logiciel informatique Paquet statistique pour les sciences sociales (IBM SPSS Statistics 21).

3. Résultats et discussion

3-1. Caractérisation de l'eau de surface et l'eau souterraine

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques sont présentés dans le ***Tableau1***.

3-1-1. Paramètres physiques

La conductivité représente l'aptitude de l'eau à conduire le courant électrique. Elle dépend de la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau [11]. La plupart des eaux naturelles sont caractérisées par une conductivité comprise entre 10 et 1000 µS/Cm [12], des changements notables des valeurs de la conductivité peuvent traduire des apports importants de sels minéraux issus du réservoir ou un apport ponctuel important. Dans cette étude la conductivité varie entre 60 et 89 µS/Cm avec une moyenne de 77 µS/Cm pour les eaux de surface et entre 100 et 1513 µS/Cm avec une moyenne de 452,8 µS/Cm pour les eaux souterraines, reflétant ainsi une variation de minéralisation dans les différentes parties de la zone d'étude, ce qui donne naissance aux différents types d'eaux comme on peut le voir sur la ***Figure 3***. Le point P3 présente une valeur de conductivité relativement élevée tout en restant inférieur à la valeur guide d'eau de consommation de l'OMS [13]. Les TDS varient entre 88 et 107 mg/L avec une moyenne de 95,25 mg/L pour les eaux de surface et entre 107 et 1003 mg/L avec une moyenne de 302,67 mg/L pour les eaux souterraines. Selon la classification des eaux en fonction de leur salinité [14], une eau est considérée comme douce si on a des TDS < 1000 mg/L et saumâtre pour des TDS compris entre 1000 et 10000 mg/L. Sur cette base nous pouvons dire que la quasi-totalité des eaux de la zone d'étude sont douces, à l'exception du point P3 qui est une eau plutôt saumâtre avec un TDS supérieur à 1000 mg/L. Les variations assez importantes des valeurs de conductivité électrique et TDS sont dues aussi bien aux processus géochimiques naturels qu'anthropiques. Les températures des eaux de surface varient entre 28,2°C (Ch_Av) et 29,3 °C (Ch_Am), soit une moyenne de 28,68°C et celles des eaux souterraines varient entre 27 °C (P1) et 31,6 °C (P2) avec une moyenne de 28,4°C. Dans les deux cas les températures obtenues sont proches de la température moyenne annuelle de la région qui est de 28°C. Cela fait dire que les eaux de la zone d'étude sont en équilibre thermique avec l'atmosphère. Le pH des eaux naturelles est un paramètre important qui permet de définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau et conditionne de nombreux équilibres physico-chimiques. Il varie selon la nature des sols traversés, il peut être aussi influencé par divers activités naturels ou anthropique [15]. Les valeurs du pH des eaux de surface varient entre 6,45 (mare) et 7,19 (BK) avec une moyenne de 6,88 tandis que celles des eaux souterraines varient de 6,7 (P8) à 7,6 (P1) avec une moyenne de 7,27. Certes, les valeurs des pH des eaux de surface et celui des eaux souterraines sont légèrement différentes mais elles sont dans tous les cas comprises dans l'intervalle de pH admis par l'OMS ***(Tableau 2)***.

Tableau 1 : *Statistiques descriptives pour les 19 points d'eaux prélevés*

		C25°(µs/cm)	pH	T (°C)	TDS (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	SO_4^{--} (mg/l)	Ca^{++} (mg/l)	Mg^{++} (mg/l)	K^+ (mg/l)	Na^+ (mg/l)	Fe^{3+} (mg/l)	Mn^{2+} (mg/l)
Eau de surface	Min	60	6,45	28,2	88	27,92	5	0,64	6	4	2	4	2,2	0,55	0,01
	Max	89	7,19	29,3	107	61	6	3,2	26	16	8	5,9	6,5	2,82	0,3
	Moy	76,75	6,88	28,68	95,25	48,81	5,38	1,37	16,00	8,00	5,65	4,58	5,08	1,54	0,09
	Ecart-type	13,07	0,32	0,49	9,14	14,47	0,48	1,23	10,46	5,66	2,62	0,89	1,96	1,11	0,14
	n	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Eau souterraine	Min	100	6,7	27	107	55	6	1,8	0	2	3	2,2	8,7	0	0
	Max	1513	7,6	31,6	1003	298	209	212	21	100	40	50,3	103,7	2,42	0,9
	Moy	452,87	7,27	28,42	302,67	116,53	55,00	41,67	8,00	32,87	13,80	11,17	23,31	0,58	0,11
	Ecart-type	420,68	0,29	1,10	249,90	64,05	61,99	57,65	6,74	31,94	10,12	12,53	24,36	0,60	0,23
	n	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Tableau 2 : *Valeurs guides pour la qualité de l'eau de boisson*

Paramètres	pH	HCO_3^- (mg/l)	Cl^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	SO_4^{--} (mg/l)	Ca^{++} (mg/l)	Mg^{++} (mg/l)	K^+ (mg/l)	Na^+ (mg/l)	Fe^{3+} (mg/l)	Mn^{2+} (mg/l)
Normes OMS	6,5-8,5		250	50	250	100	50	12	200	0,3	0,5

3-1-2. Paramètres chimiques

Le ***Tableau 1*** montre que les échantillons d'eau sont également caractérisés par des variations considérables des concentrations en éléments chimiques dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines. En ce qui concerne les eaux de surface, l'ensemble des teneurs des ions dans l'eau est conforme aux normes OMS. Par contre, pour les eaux souterraines certains paramètres ont des valeurs significativement élevées, dépassant parfois les valeurs guide de l'OMS ***(Tableau 2)***. Les teneurs en chlorures des eaux contrôlées varient de 6 mg /L à 209 mg /L sans pour autant dépasser les normes OMS qui est de 250 mg/L. Ces valeurs de chlorures peuvent être considérées normales cependant dans le contexte d'eau douce, la présence de teneur élevée en chlorure peut se justifier par l'influence des activités anthropiques conjuguée à celle de la température. Le potassium donne des valeurs moyennes qui varient entre 2,2 mg/L et 50,3 mg/L. 26 % des points d'eau souterraines ont des teneurs supérieures à la norme de potabilité fixée par l'OMS qui est de 12 mg/L, Ces teneurs anormalement élevées, suggèrent que ces points d'eaux sont soumis à une influence anthropique et ou à l'influence de l'évaporation. Le potassium est souvent utilisé comme engrais sous forme de sulfate de potassium, de chlorure de potassium, ou encore de nitrate de potassium [16]. Les teneurs en nitrates varient entre 0,64 mg/L et 212 mg/L et 33 % des points d'eaux ont des teneurs supérieures à la valeur guide d'eau de consommation de l'OMS qui est fixée à 50 mg/L. La présence de nitrate en quantité élevée dans l'eau est probablement due à l'utilisation des fertilisants synthétiques et des fumiers associés aux cultures, à l'élevage intensif et à la décomposition des matières organiques [17, 18]. Ils peuvent provenir également des déchets organiques issus des latrines, des fosses septiques mal construites et des dépôts sauvages d'ordures [19, 20].

Les valeurs moyennes du sodium varient entre 6,1mg/l et 103,7 mg/L. Dans les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites, la teneur en sodium se situe entre 1 et 20 mg/L [21]. Les teneurs anormalement élevées ne peuvent s'expliquer que par l'influence d'une source anthropique. Des études antérieures ont montré que les eaux enrichies par le sodium et le chlorure ont pour origine les déchets urbains riches en NaCl [22]. Les concentrations de calcium se situent entre 2 et 100 mg/L. Certes, ces valeurs sont pour la plupart inférieures à la norme OMS, mais pour la zone d'étude, certains points présentent des teneurs assez élevées, indiquant l'origine anthropique urbaine. Outre l'influence des sources anthropiques, l'évaporation peut également expliquer en partie les teneurs anormalement élevées du potassium, calcium et sodium dans les eaux. La ***Figure 2A*** montre la variation de la concentration en fer dans les eaux étudiées. Les valeurs obtenues sont assez élevées dans la plupart des eaux souterraines et dans la totalité des eaux de surface où elles sont supérieures à 0.3 mg/L, taux inadmissible pour la consommation humaine selon l'OMS. Les teneurs élevées en fer ont pour origine la nature géologique du terrain riche en cet élément ou les déchets domestiques. Le fer peut provenir également de la détérioration de la tuyauterie d'alimentation à base métallique. Pour une valeur supérieur à 0,1 mg/L, le fer devient gênant car il confère à l'eau une couleur jaune à orangée et tâche le linge. Il donne à l'eau un goût métallique désagréable, et au contact de l'air se dépose sous forme d'hydroxyde de fer. Par ailleurs, lorsque le fer est présent dans l'eau, il favorise la prolifération de certaines souches de bactéries qui le précipitent ou corrodent les canalisations [23]. Pour le Manganèse, la quasi-totalité des points prélevés présente des valeurs relativement faible avec une moyenne

de 0,11 mg/L à l'exception du point P4 qui présente une valeur de 0,9 mg/L, dépassant la norme de l'OMS limitée à une valeur inférieure à 0,5mg/L ***(Figure 2B)***. La valeur élevée en Mn^{2+} au point P4 est un indice de pollution qui peut être due probablement aux activités anthropiques à proximité de ce point. Les études antérieures sur la teneur en manganèse ont relevé qu'une concentration élevée de l'ordre de 0,14 mg/L dans l'eau peut entrainer des problèmes de santé tel que la baisse du quotient intellectuel chez les enfants [24, 25]. Le fer et le manganèse, sont souvent présents à l'état naturel et en association dans de nombreux types de roches [26]. Ces deux éléments proviennent pour la plupart de l'altération météorique des roches, des minéraux comme les amphiboles, les micas ferromagnésiens, les sulfures de fer, les magnétites, les oxydes, les carbonates et des minéraux d'argile ferrugineuse [27]. Leurs concentrations dans l'eau peuvent augmenter également, sous l'influence de certaines activités anthropiques, car ils sont employés dans de nombreuses applications industrielles : métallurgie, industrie électrique, industrie chimique, industrie de verre et de la céramique, carburant et une fois qu'ils sont rejetés dans la nature, ils sont drainés vers les eaux.

.

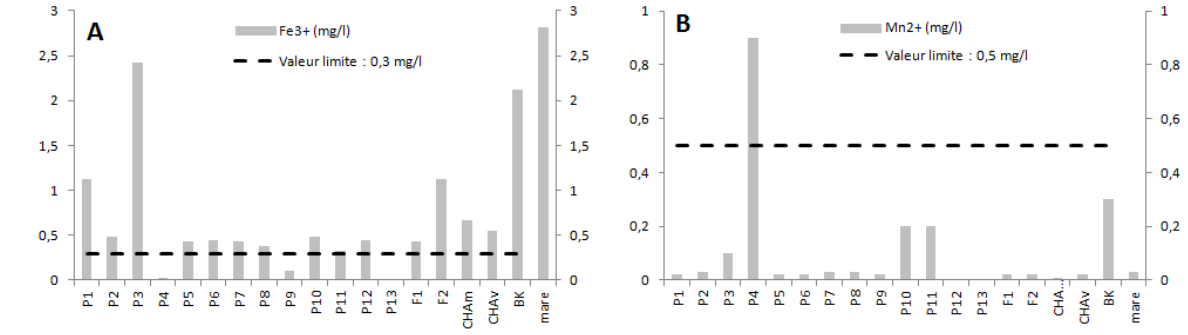

Figure 2 : *Variation spatiale des valeurs de concentrations en fer (A) et en Manganèse (B)*

3-2. Les différents types d'eaux de surface et eaux souterraines

La ***Figure 3*** représentant le diagramme triangulaire de Piper et la ***Figure 4*** représentant le diagramme semi - logarithmique de Schöeller-Berkaloff ont été utilisés pour déterminer les différents types d'eau. La représentation des concentrations des éléments majeurs sur le diagramme de Piper permet de distinguer trois principaux groupes d'eaux et révèle une variabilité du faciès chimique des eaux de la ville de Sarh, confirmée par le diagramme de Scholler-Berkallov. Ainsi, on peut y distinguer les eaux de type Ca- HCO3- (36,84 %), Na+K-HCO3 (15,79 %), Ca-Mg-Na+K-HCO3 (10,52 %) réparties entre les groupes I et II. Ces eaux ont une minéralisation relativement faible, par ailleurs 75 % des eaux de surface se trouve dans le groupe I. Ces eaux peuvent être influencées par l'hydrolyse des silicates et par les échanges de base. Et les eaux de type Ca- HCO3-Cl-NO3 (15,79 %), Na+K-HCO3-Cl-NO3 (5,27 %), Ca-Mg-Na+K-HCO3-Cl-NO3 (15,79 %), représentant 36,85 % de la totalité des eaux. Elles sont essentiellement regroupées dans le groupe III. Certaines de ces eaux sont enrichies en chlorure et nitrate et pour d'autres en calcium et sodium ; on les rencontre surtout au centre ville où les activités domestiques sont intenses et dans la partie nord de la zone d'étude où en saison des pluies les pratiques agricole sont intenses (cf carte de localisation des points ***Figure 1***). Le chimisme de ces eaux résulte probablement de l'action combinée de l'hydrolyse des silicates, des échanges de base, de l'influence de la température et de l'influence des activités humaines.

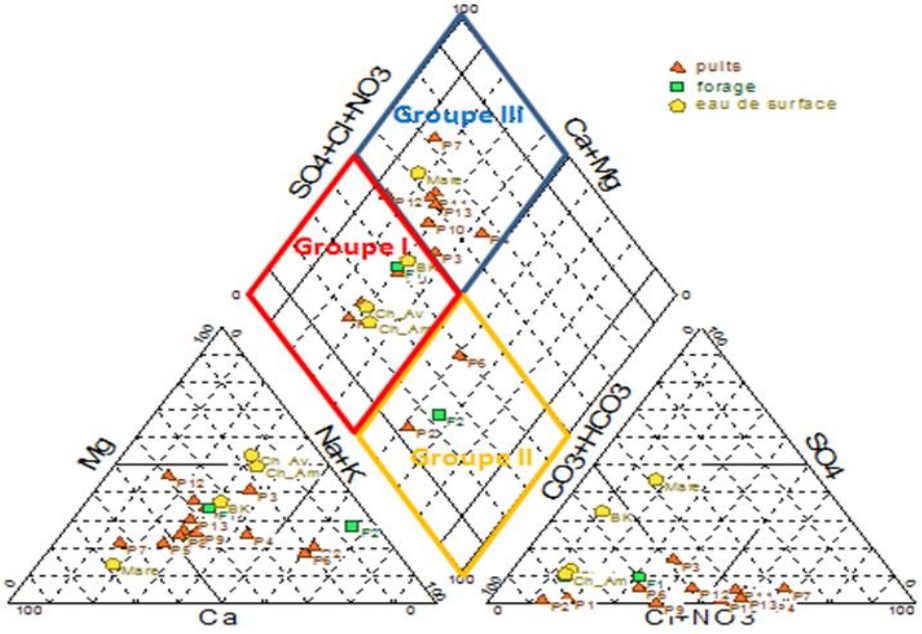

Figure 3 : *Diagramme de piper des eaux de surface et des eaux souterraines*

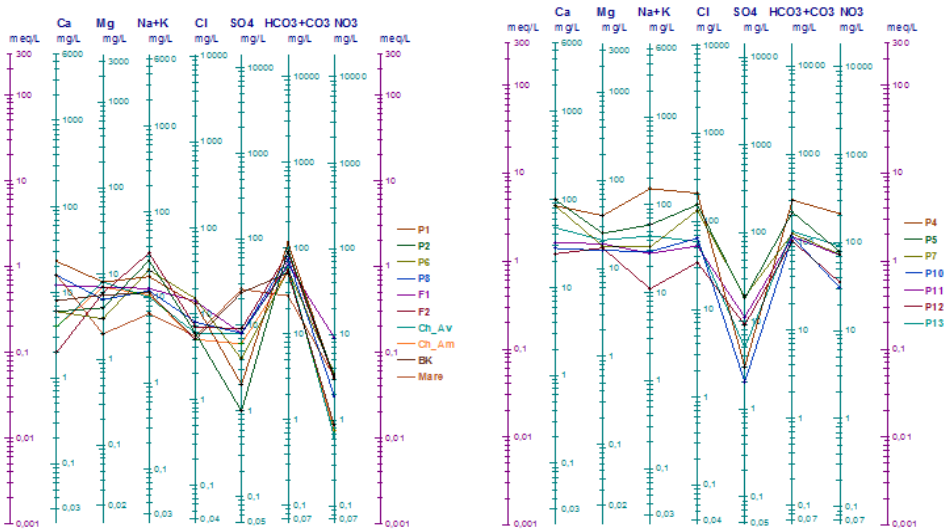

Figure 4 : *Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de surface et des eaux souterraines*

3-3. Processus de minéralisation

3-3-1. Minéralisation naturelle

Les graphiques de Gibbs [28] sont utilisés pour mettre en évidence les principaux mécanismes responsables de la minéralisation des eaux. Ce mécanisme établi par Gibbs [29] prend en compte de l'influence de trois mécanismes à savoir l'évaporation, les précipitations et de l'interaction entre la roche et l'eau sur la composition chimique de l'eau. La chimie de l'eau est représentée en fonction de la prédominance de certains constituants tels que le Na^+ et Cl^- d'une part et le Ca^{2+} et HCO_3^- d'autre part ; Les fractions relatives des cations et anions sont représentées en fonction des TDS, et différents types d'eaux occupent une position

précise dans le diagramme. Les ***Figures 5A et 5B*** montrent que la plupart des points d'eau ont un rapport $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ et $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ inférieur à 0,4 et des TDS relativement faible, pour ces points d'eau nous pouvons dire que l'altération de la roche est le principale mécanisme qui contrôle la composition chimique de l'eau. Il y a des points qui ont des rapports qui augmentent conjointement avec les TDS, cela indique que la chimie de l'eau est contrôlée non seulement par que l'altération de la roche mais également par l'évaporation-précipitation. Dans notre cas, le phénomène de précipitation reste très limité car la majorité des eaux est sous - saturée par rapport aux minéraux carbonatés et aux évaporites ***(Figure 7A)***. Parmi ces points, on a notamment les points P4, P5, P7, P10, P11 et P13 qui sont tous des puits ouverts. Au niveau de la ***Figure 5A***, on constate également qu'un certains nombre de points composés de puits ouvert, forage et eau du fleuve Chari, ont un TDS relativement faible (< 200 mg/L) et un rapport $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ supérieur à 0,4, ce qui suggère que l'échange de cations joue également un rôle important sur la chimie de l'eau en augmentant le Na^+ et en diminuant le Ca^{2+}. Parmi ces points d'eau, on a P2, P3, P6, F2, Ch-av, Ch-am.

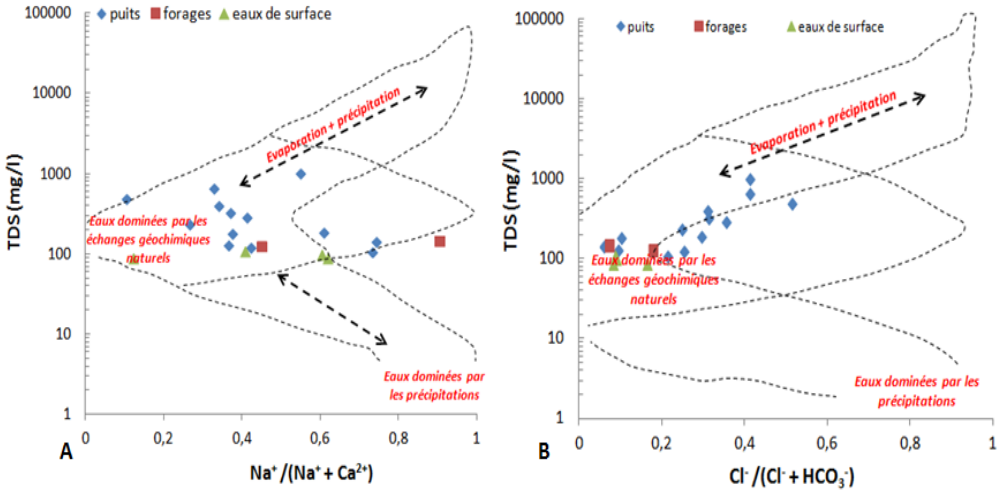

Figure 5 : *La chimie des eaux souterraines exprimée en fonction de la chimie des eaux de pluie, de la matrice rocheuse et de l'évaporation*

Les évolutions de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ et $Na^+ + K^+$ en fonction de la somme totale de cations ***(Figure 6A et 6B)*** montrent que la plupart des échantillons se situent en dessous de la ligne théorique de pente 1: 1, ce qui indique que les cations proviennent de l'altération des silicates et / ou de la dissolution des sels du sol ou encore d'échange d'ions entre l'eau et le réservoir [30]. L'évolution de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ Par rapport à $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ ***(Figure 6C)*** montre que certains points d'eaux sont proches de la droite de pente1 : 1 suggérant que l'altération du silicate est le principal processus impliqué dans l'évolution de ces eaux. D'autres points d'eaux se situent au-dessus de la ligne de pente 1 : 1 et montrent un excès de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ par rapport à $SO_4^{2-} + HCO_3^-$. Cet excès d'ions est du aux processus d'échange de cations, à un apport anthropique et / ou à l'influence de l'évaporation. Sur la ***Figure 6D***, on a l'évolution de $Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}$ en fonction de $Na^+ - Cl^-$, et si on considère que les échanges de cations jouent un rôle important dans le processus de minéralisation de l'eau cela doit se traduire par une forte relation linéaire entre les variables avec une pente de - 1 [31]. Dans notre cas ***(Figure 6D)***, on remarque que la plupart des points d'eaux sont répartis le long d'une droite de pente - 1.68 et présentent une bonne corrélation (0.76), cela confirme qu'il existe un processus d'échange ionique. Cependant le fait d'avoir quelques points répartis au-dessus et en dessous de la tendance linéaire, cela suggère que la minéralisation des eaux dépend d'autres processus en dehors de celui d'échange d'ions.

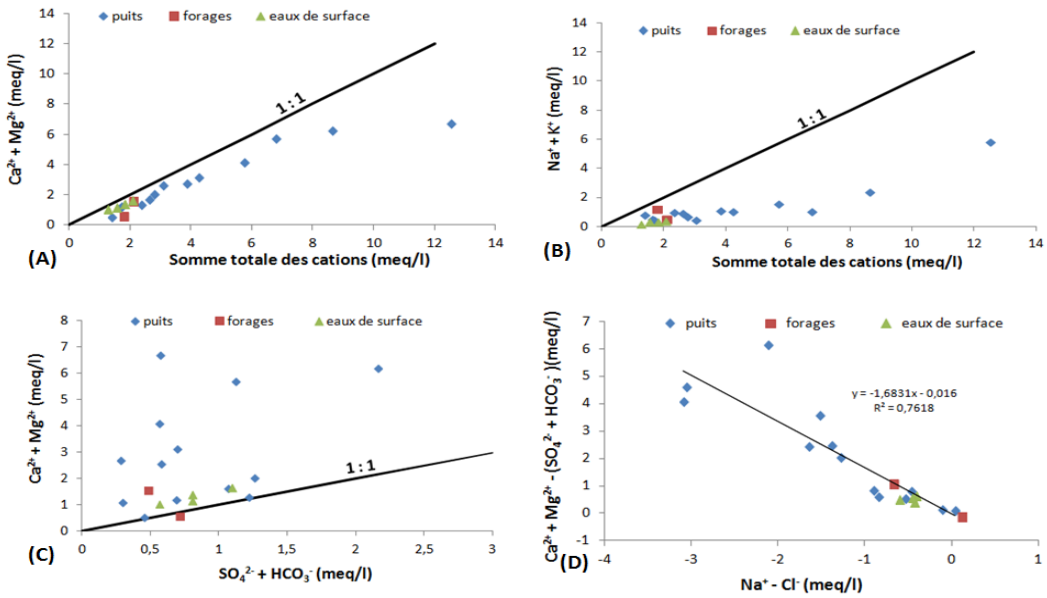

Figure 6 : *Corrélation entre les différents paramètres chimiques : (A) - $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ en fonction de la somme totale de cations, (B) - $Na^{+} + K^{+}$ en fonction de la somme totale de cations, (C) - $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ en fonction de $SO_4^{2-} + HCO_3^{-}$ et (D) - $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ - $(SO_4^{2-} + HCO_3^{-})$ en fonction de Na - Cl*

3-3-2. Mise en évidence de l'influence anthropique

Les eaux peuvent être considérées comme exemptes de pollution lorsque le rapport NO_3^- / Cl^- est compris entre 0,05 - 0,22 [32]. Sur cette base, nous considérons que dans le cadre de notre étude 66 % des échantillons d'eaux souterraines (puits et forages) et 25 % des échantillons d'eau de surface dépassent cette plage, révélant ainsi l'ampleur de la pollution par les nitrates. Le graphique représentant l'évolution du rapport NO_3^- / Cl^- en fonction de Cl^- ***(Figure 7B)***, on différencie deux groupes d'eau : dans le premier groupe, les points d'eaux sont alignés suivant la droite 1 et sont surtout dominés par les nitrates, on y trouve les points P11, P12 et P13 situés vers la partie nord de la ville ou les pratiques agropastorale sont assez importantes. Et un deuxième groupe alignés suivant la droite 2 et qui sont plutôt dominés par les chlorures, on y trouve les points P4, P5, et P7 situés au centre ville. Dans les deux cas, il y a une relation entre chlorures et nitrates, ceci indique clairement que les deux éléments proviennent, au moins pour partie, d'une même source de pollution. Ces sources de pollution peuvent être d'origine agricole et/ou domestique. Pour de faibles valeurs de Chlorures, certains points ont tendance à s'aligner sur ou au dessus de la droite de pente 1 : 1 ***(Figure 7C)***, ils présentent par ailleurs un rapport Na/Cl élevé et de faible teneurs en chlorure ***(Figure 7D)***; ces points d'eaux sont en générale faiblement ou moyennement minéralisées et sont régie par l'hydrolyse des silicates. On note aussi que la majorité des points sont répartis en dessous de la ligne de pente 1 ***(Figure 7C)***, ce déficit en Na^+ s'explique par le phénomène d'échange ionique de base entre l'eau et l'aquifère et se traduit par une absorption de Na^+ et une libération de Ca^{2+}. Les ions Na^+ et Cl^- ***(Figure 7C)*** présentent une assez bonne corrélation (0,66) et pour des teneurs en chlorures supérieur à 30 mg/l, les points relativement minéralisés tels que P4, P5, P7, P10, P11, P12, et P13 présentent une certaine linéarité qui traduit une source commune du chlorure et du sodium. Comme cela a déjà été souligné par Djoret [22], l'augmentation concomitante de ces deux éléments a pour origine les déchets urbains riches en NaCl, ou résulte simplement d'une concentration par évaporation. Sur la ***Figure 7D***, on peut faire le même constat car pour ces eaux, le rapport Na/Cl est toujours faible, alors que les eaux évoluent en direction du pôle d'eau influencé par les activités anthropiques et/ou l'évaporation. L'évolution de ($HCO_3^-/Cl^- + SO_4^{2-}$) - TDS ***(Figure 7E)***, confirme les

observations précédentes. Sur le graphique on note la présence de deux pôles : le premier pole (composé de quelques puits, de la totalité des forages et eaux de surface) est dominé par les ions HCO_3^- et des TDS inférieures à 300 µS/Cm, Ce pôle est régi par l'hydrolyse des silicates. Le second, est dominé par les ions Cl^- et SO_4^{2-} et des TDS plus élevé (1000 meq/L) à cause de l'influence anthropique et/ou l'évaporation en plus de la minéralisation naturelle. Entre ces deux pôle à mesure que le rapport (HCO_3^-/ Cl^- + SO_4^{2-}) diminue les TDS augmentent montrant ainsi que la dégradation de la qualité de l'eau s'accompagne d'une augmentation de la minéralisation. Le potassium présente une très bonne corrélation avec les nitrates et une assez bonne corrélation avec les chlorures ***(Figure 7F)*** montrant ainsi que les ions K^+ ont en partie une origine anthropique.

3-4. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La CAH est une méthode statistique qui a pour objectif de grouper les individus en quelques classes distinctes. C'est une méthode efficace qui permet de mettre en évidence des relations complexes entre un nombre important d'échantillons. Cette technique a été utilisée dans un certain nombre d'études afin de distinguer les caractéristiques de la qualité de l'eau [33]. Pour cette étude, nous avons utilisé la méthode d'agrégation de Ward [34] et la distance euclidienne, la combinaison des deux permet de produire des groupes d'échantillons distincts les uns des autres [35]. La méthode CHA est aussi appliquée aux différents paramètres chimiques et permet d'identifier les relations existant entre ces paramètres. Nous avons appliqué cette méthode à une base de données comportant 19 échantillons (observations) et 10 paramètres chimiques (variables). Le dendrogramme des variables obtenu à la ***Figure 8A*** met en évidence deux principaux groupes des variables. Le premier groupe (groupe1) se subdivise en deux sous-groupes : le sous-groupe 1 comprend Mg^{2+}, pH, K^+ et SO_4^{2-} dans lequel l'association étroite entre ces ions suggère leur origine naturelle. En effet, ces ions proviendraient de l'hydrolyse des silicates ; le sous-groupe 2 comprend Ca^{2+} et Na^+ dont la similitude suggère la présence d'échanges entre le Ca^{2+} et le Na^+. A ces échanges de bases, s'ajoutent une minéralisation élevée des eaux, traduisant une influence des activités anthropiques et du phénomène d'évaporation. Le deuxième groupe (groupe 2) contient HCO_3^-, Cl^- et NO_3^- en étroite association, il traduit une minéralisation liée aux apports superficiels d'origine anthropique.

Le dendrogramme des échantillons de la ***Figure 8B*** permet une classification des points d'eaux selon leur ressemblance. Ainsi, trois classes d'eau se dégagent :

- Classe 1 : Elle regroupe les eaux les moins minéralisées, ayant des conductivités entre 60 et 210 µS/Cm, la teneur moyenne en nitrate relativement faible avec une moyenne de l'ordre de 3,18 mg/L. La minéralisation de ces eaux est essentiellement d'origine naturelle.
- Classe 2 : Elle correspond aux eaux moyennement minéralisées avec une conductivité variant entre 282 et 649 µS/Cm et dans lesquelles les teneurs moyennes en nitrate et chlorure sont respectivement de l'ordre de 46,56 mg/L et 48,6 mg/L.
- Classe 3 : Elle correspond à l'ensemble des eaux qui se caractérisent par une forte minéralisation pour des valeurs entre et 857 et 1513µS/Cm. Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 121,33 mg/L pour les nitrates et 165,7 mg/L pour les chlorures. Cette classe est également marquée par des teneurs relativement élevées en Ca^{2+} et Na^+ avec une moyenne respective de 90 mg/L et 54,23 mg/L.

Les eaux des classes 2 et 3 correspondent essentiellement aux eaux du groupe III du diagramme de Piper ***(Figure 3)***, ce sont les puits P4, P5, P7, P10, P11, P12, P13 et la mare dont la plupart est relativement riche en nitrates et chlorure. La présence de ces agents polluants dans les eaux suggère la présence d'une contamination de la nappe de la ville de Sarh. Cette contamination est due d'une part, à l'apport de nitrate par les polluants domestiques. En effet ces points d'eaux ne sont pas protéger car ils sont directement en

contact avec l'atmosphère, ce qui les rend vulnérables aux polluants organiques issus des activités domestiques telles que les latrines, les dépôts sauvages d'ordures, l'infiltration des eaux usées. D'autre part, à la production des nitrates liée aux pratiques agricoles. Les nitrates produits lors de la destruction de la matière organique sont lessivés entrainant ainsi la pollution de la nappe.

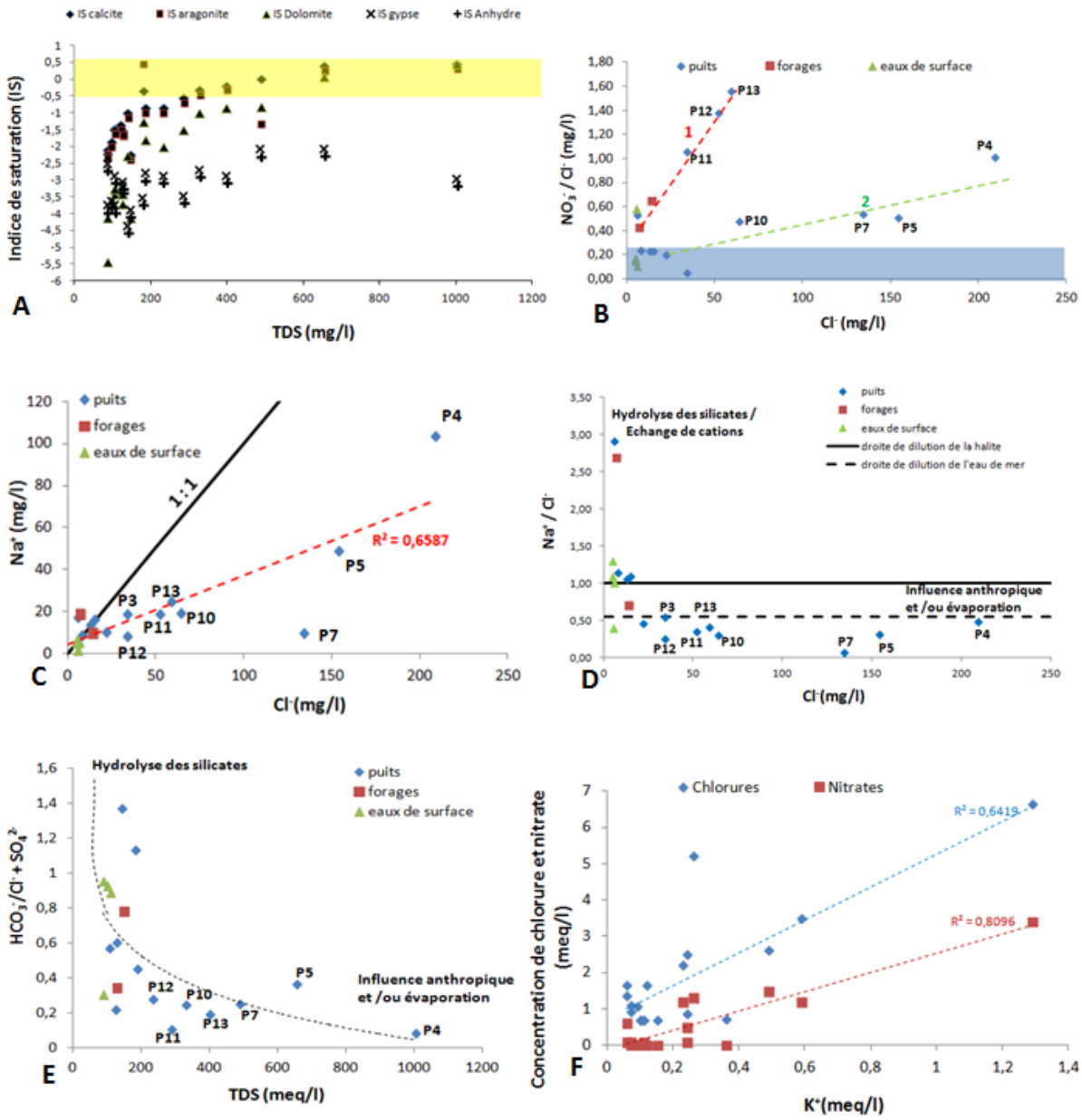

Figure 7 : *Indice de saturation (IS) en fonction des TDS (A) - NO_3^-/Cl en fonction de Cl (B) - Na^+ en fonction de Cl (C) - Na^+/Cl en fonction de Cl (D) - HCO_3^-/Cl $+SO_4^{2-}$ en fonction des TDS (E) - Cl et NO_3^- en fonction de K^+ (F)*

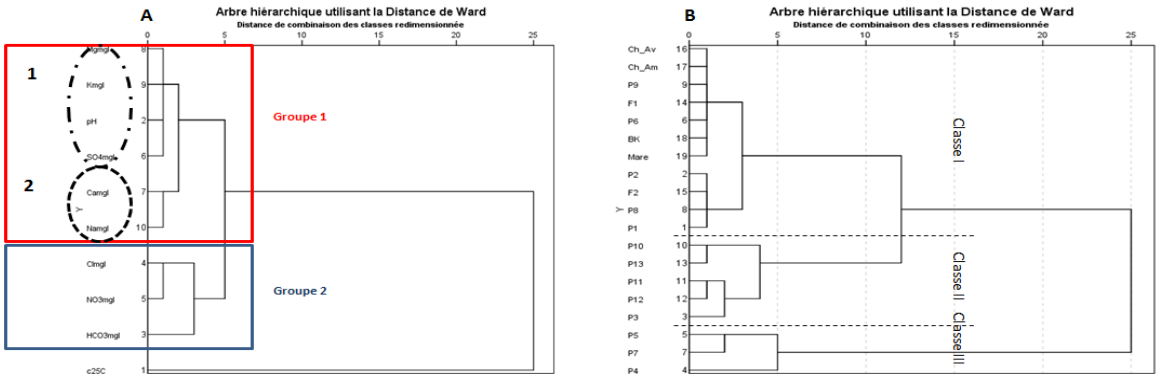

Figure 8 : *Dendrogramme des variables (A) et des échantillons (B) des eaux de la ville de Sarh*

4. Conclusion

Cette étude permet de mettre en évidence les caractéristiques chimiques des eaux de surface et souterraines de la ville de Sarh. Les eaux ont une minéralisation assez variées avec une conductivité qui varie entre 60 et 89 µS/cm pour les eaux de surface et entre 100 et 1513 µS/cm pour les eaux souterraines. Il ressort que, la quasi-totalité des paramètres analysés pour les eaux superficielles répond aux normes d'eau de consommation fixées par l'OMS, à l'exception du fer qui dépasse la norme fixée à 0,3 mg/L. Dans les eaux souterraines on note des teneurs en nitrates supérieur à 50 mg/L dans les puits P4, P5, P7, P11, P13; en potassium supérieur à 12 mg/L dans les puits P4, P7, P13 et en Fer supérieur à 0,3 mg/l dans la totalité des points. Le faciès chimique des eaux de surface est bicarbonaté calcique et bicarbonaté sodi potassique et ces eaux sont faiblement minéralisées Le faciès chimique des eaux souterraines est bicarbonaté calcique, bicarbonaté sodi potassique, bicarbonaté avec un mélange de cations lorsqu'elles sont faiblement minéralisées. Lorsqu'elles sont moyennement et fortement minéralisées, elles s'enrichissent en nitrate et chlorure. Cette variabilité de faciès reflète l'interaction de plusieurs processus responsable de la minéralisation de l'eau. Parmi ces processus, il y a l'hydrolyse des silicates, les échanges de base, l'influence de la température et celle des activités anthropiques. Le fer est présent dans la quasi-totalité des eaux de surface et eaux souterraines. Cette teneur élevée dans les eaux est liée à la nature géologique du sol riche en fer, à la détérioration de la tuyauterie à base de fonte ou encore à l'influence de déchets domestiques. La CAH a confirmé la présence de plusieurs processus régissant la minéralisation des eaux et a permis de distinguer trois principales classes d'eau à savoir faiblement, moyennement et fortement minéralisées. Certains points d'eau présentent des problèmes de qualité assez inquiétante avec des teneurs élevées en nitrate. Or une eau d'une telle qualité si elle n'est pas traitée au préalable, prédispose et expose ses consommateurs à des maladies. Par ailleurs, les nitrates contribuent avec les phosphates à modifier l'équilibre biologique des milieux aquatiques, en provoquant des phénomènes d'eutrophisation. Pour éviter la généralisation de la dégradation de la nappe des solutions idoines doivent être mises en œuvre par le suivi périodique des paramètres physicochimiques, la gestion efficace des eaux usées et des ordures ménagères, l'utilisation rationnelle des fertilisants agricoles, la déferrisation et la dénitrification des eaux de consommation.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) et l'Institut de Recherche et Développement (IRD) qui ont conjointement financé le projet dont découle ce travail.

Références

[1] - L. GOUAIDIA, M. S. LAOUAR, A.DÉFAFLI, N. ZENATI, Origine de la minéralisation des eaux souterraines d'un aquifère dans une zone semi - aride, cas de la nappe de la Merdja, nord - est algérien. *International Journal of Environment & Water*, 6, 2 (2017) 104 - 118

[2] - A. BOUBAKAR HASSANE, Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse unique, Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), (2010) 198 p.

[3] - O. B. YAPO, V. MAMBO, A. SEKA, M. J. A. OHOU, F. KONAN, V. GOUZILE, A. S.TIDOU, K. V. KOUAME, P. HOUENOU, Évaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire) : Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* , 4, (2) (2010) 289 - 307

[4] - C. DEGBEY, M. MAKOUTODE, E. M. OUENDO, C. DE BROUWER, Pollution physico-chimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009. *Int. J. Biol. Chem. Sci.,* 4 (6) (2010) 2257 - 2271

[5] - E. K. AHOUSSI, N. K. KEUMEAN, M. A. KOUASSI2 et B. Y. KOFFI, Etude des caractéristiques hydrogéochimiques et microbiologiques des eaux de consommation de la zone périurbaine de la ville de Man : cas du village de Kpangouin (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.,* 11 (6) (2018) 3018 - 3033

[6] - M. L. BELGHITI, A. CHAHLAOUI, D. BENGOUMI, R. EL MOUSTAINE, étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la Nappe plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). *Larhyss Journal*, 14 (2013) 21 - 36

[7] - V. T. PATIL, P. R. PATIL, Physicochemical Analysis of Selected Groundwater Samples of Amalner Town in Jalgaon District, Maharashtra, India. *E-Journal of Chemistry*, 7, (1) (2010) 111 - 116

[8] - R. A. N. LAWANI, N. C. KELOME, M. AGASSOUNON DJIKPO TCHIBOZO, J. B. HOUNKPE, A. ADJAGODO, Effets des pratiques agricoles sur la pollution des eaux de surface en République du Bénin. *Larhyss Journal*, 30 (2017) 173 - 190

[9] - M. AMBARREF, A. SAADIA, A. S. BERNOUSSI, B. Y. HADDOUCHI, Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines : application à la plaine du Gharb (Maroc). Revue des Sciences de l'Eau, 20 (2) (2007) 185 - 199, DOI : 10.7202/015812ar

[10] - J. P. WOLFF, Carte géologique de la République du Tchad au 1/1500000. BRGM, Paris, (1964)

[11] - E. DERWICH, L. BENAABIDATE, A. ZIAN, O. SADKI, D. BELGHITY, Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut sebou en aval de sa confluence avec oued fes. *Larhyss Journal*, 08, (2010) 101 - 112, DOI: https://www.academia.edu/26186009/

[12] - D. CHAPMAN, Water Quality Assessment : A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring. 2nd Ed, F and FN Spon, London, (1996)

[13] - O.M.S, Directives de qualité pour l'eau de boisson. 2nd Ed., Vol 2, Critères d'hygiène et documentation à l'appui, (2000) 1050 p.

[14] - A. ABBASNIAA, N. YOUSEFIA, A. H. MAHVIA, R. NABIZADEHA, M. RADFARDC, M. YOUSEFIA and M. ALIMOHAMMADIA, Evaluation of groundwater quality using water quality index and its suitability for assessing water for drinking and irrigation purposes : Case study of Sistan and Baluchistan province (Iran). Human and ecological risk assessment : An International Journal, (2018) 31 P., http: // www. Tandfonline.com/bher

[15] - K. C. RICE, J. S. HERMAN, Acidification of Earth : An assessment across mechanisms and scales. *Applied Geochemistry* 27, (2012) 1 - 14

[16] - P. PESSON, Pollution des eaux continentales, incidences sur les biocénoses aquatiques. (1979) 97 - 101

[17] - - P. LEVALLOIS, D. PHANEUF, La contamination de l'eau potable par les nitrates : analyse des risques à la santé. *Revue Canadienne de Santé Publique*, 85, (3) (1994) 192 - 196
[18] - H. SAMAK, Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. (2002) 77 p.
[19] - M. EL HASSOUNE, A. BOUZIDI, Y. KOULALI et D. HADARBACH, Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Setta (Maroc). *Bull. de l'Inst. Sci., Rabat Sect. Sci. De la vie*, 28, (2006) 61 - 71
[20] - A. A. TANDIA, Origine, évolution et migration des formes de l'Azote minéral dans les aquifère situés sous environnement peri urbain non assaini : cas de la nappe des sable quaternaire de la région de Dakar (Sénégal). Thèse d'état, Université de Dakar. (2000)
[21] - G. MATTHESS, Geol. Mijinbouw, 53, 194. -In Forstner U ETWittmann GTW Metal pollution in the Aquatic Environment, (1994) 355 - 359
[22] - D. DJORET, Etude de la recharge de la nappe du Chari Baguirmi par des méthodes chimiques et isotopiques. Thèse unique, Université d'Avignon des pays de Vaucluse (2000) 161 p.
[23] - M. RUIVARD, Le fer : un micronutriment essentiel mais un pouvoir toxique potentiel. Université d'été de Nutrition. Clermont Ferrand, (2003). Disponible sur le site : mruivard@chu-clermontferrand.fr
[24] - J. ZAYED, M. PANISSET, D. MERGLER, Système nerveux, in Environnement et Santé publique - Fondements pratiques. Manuel publié en 2003 (Chapitre27), (2003) 699 - 712
[25] - F. M. BOUCHARD, S. SAUVÉ, B. BARBEAU, M. LEGRAND, M. E. BRODEUR, T. BOUFFARD, E. C. LIMOGES, D. BELLINGER et D. MERGLER, Intellectual lmpairment.in School-Age Children Exposed to Manganese from Drinking Water. Environ Health Perspect, 119, (2011) 138 - 143
[26] - O. DONALD, Enlèvement du fer et du manganèse de l'eau souterraine par oxydation et par microfiltration. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) Département de génie civil Faculté des Sciences et génie Université Laval, (1998)
[27] - MDDEFP, Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. Eau souterraine, (page consultée en ligne en 2015). http://www.MDDEFP.gouv.qc.ca/eau/inter.htm
[28] - A. J. ADEWUMI1, A. Y. B. ANIFOWOSE, F. O. OLABODE, T. A. LANIYAN, Hydrogeochemical Characterization and Vulnerability Assessment of Shallow Groundwater in Basement Complex Area, Southwest Nigeria. Contemp. Trends. Geosci., 7, (1) (2018) 72 - 103, DOI: 10.2478/ctg-2018-0005
[29] - R. J. GIBBS, Mechanisms controlling world water chemistry. *Science,* 170, 3962 (1970) 1088 - 1090
[30] - N. AGHAZADEH, M. CHITSAZAN, Y. GOLESTAN, Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. *Appl Water Sci*, (2016) 18 p. https://www.academia.edu/30137540 DOI 10.1007/s13201-016-0498-9 -
[31] - R. S. FISHER, F. W. MULLICAN, Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert Trans- Pecos Texas USA. Hydrogeol J, 10, (4) (1997) 455 - 547
[32] - P. LI, Research on groundwater environment under human interferences : A case study from Weining plain, Northwest China. Thèse unique, Changan University, (2014)
[33] - B. ZHANG, X. SONG, Y. ZHANG, D. HAN, C. TANG, Y. YU, Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surfacewater and groundwater in Songnen Plain, North-east China. Water Res., 46, (8) (2012) 2737 - 2748
[34] - JR JH. WARD, Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J Am Stat Assoc*, 58, (1963) 236 - 244
[35] - C. GÜLER, G. THYNE, J. MCCRAY, K. TURNER, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10 (4) (2002) 455 - 474